

氏 名	乾 雅 博
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	第 5123 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項
学 位 論 文 名	Grand partition function and statistical properties of the quark-gluon plasma (クォーク・グルーオンプラズマの大分配関数とその統計的性質)
論文審査委員	主 査 教 授 牲 川 章 副 査 教 授 石 原 秀 樹 副 査 教 授 糸 山 浩

論 文 内 容 の 要 旨

本研究はゼロ温度・密度、また有限温度・密度下でのクォーク物質の様々な性質について解析した。まずクォーク・グルーオン・プラズマ中での基本的な熱力学的物理量である大分配関数、つまり圧力について解析を行った。現在までにこの圧力は、摂動の 6 次まで計算されており、その結果は摂動の収束の安定性と、非摂動的解析である格子シミュレーションの計算結果との整合性において問題点があった。一方、量子色力学 (QCD) の計算に現れる発散を処理する上で、繰り込み処方が用いられるが、その繰り込み処方の任意性の問題に関して提案された PMS と呼ばれる方法が知られている。本研究では摂動の 6 次まで含まれた圧力の計算結果を、PMS 処方を採用して、最適化した。適用前の圧力に比べ、最適化されたものは格子シミュレーションの結果と良い整合性を持った。特に、より現実的なクォークのフレーバー数が 3 の場合にその改善は顕著であった。

量子場系での相互作用による反応を記述する熱的振幅は、“熱的演算子表現”を用いることで、より見通しの良い形式で表すことができる。既存の形式では有限温度系についてのみ適用可能だったが、本研究ではこの“熱的演算子表現”を有限化学ポテンシャルも含まれた形式にまで拡張することに成功した。

また、ラグランジアン形式による QCD の、所謂クーロンゲージにおけるエネルギー発散の問題について解析を行った。本研究で、全ての相互作用からの寄与を含め、摂動の全次数で繰り込み可能性を損なうことなくエネルギー発散が相殺することが示された。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

現在到達している物質の基本構成粒子であるクォークから成る物質 (クォーク物質) は高温領域ではプラズマ状態にある気体 (クォーク・グルーオンプラズマ (QGP)) と考えられている。QGP の熱力学的性質は大分配関数によって決定される。摂動論による計算では、高温系特有の事情により、非摂動部分の一部を採り入れた「改良された摂動論」を使う必要があり、それによって 6 次までの計算がなされている。又、場の量子論による計算では「繰り込み処方」を選択する必要があるが、これまでの計算では伝統的な「修正された MS 処方」が用いられている。結果は、繰り込みスケールの選択に大きく依存し、次数依存性も大きく、摂動級数が収斂する傾向は見られないなど、極めて不満足なものである。

本論文では、摂動の全次数の寄与を加えた厳密な結果は、繰り込みスケール等の繰り込み処方によらないという事実に着目し、「最善の繰り込み処方」を決定することを通じて、信頼できる大分配関数を決定している。用いられている枠組は、PMS (Principles of Minimal Sensitivity) 規準と呼ばれるもので、これにより摂動の有限項までの計算結果に現れる繰り込み処方依存性を最小限にする処方が決定される。摂動計算では、大分配関数は運動量空間上の積分として与えられる。高温量子場系に対する摂動計算においては、運動量空間の

「軟領域」では「硬熱ループ」と呼ばれる、非摂動的寄与を採り入れねばならない。この「軟領域」と「硬領域」の境界のスケールは、その大きさのオーダーしか判らない不定量である。これに対して、従来の計算では硬領域、軟領域それぞれの特徴的スケールの相乗平均値をとってきた。本論文では、物理的結果は、この境界点のスケールに依存しないという事実に着目し、このスケールに関しても、繰り込み処方と同列に扱い最善のスケールを決定している。従来の「修正されたMS処方」の計算結果は相対的に低温領域でなされているモンテカルロ数値計算法による結果と比較すべくもなかったが、本論文で得られた結果は数値計算結果と満足のいく整合性を示している。又、得られた大分配関数から、クォーク・グルーオンプラズマのエントロピーは自由気体と比較し、絶対値は小さく温度依存性は大きいことが確認されている。

以上の成果は、クォーク物質の高温相であるクォーク・グルーオンプラズマの熱力学的性質の研究に大きく寄与するものであり、博士（理学）の学位を授与するに値するものと審査した。